

## Modélisation numérique du laminage à pas de pèlerin de tubes ODS en vu de limiter les risques d'endommagement

E. Vanegas<sup>a</sup>, K. Mocellin<sup>a</sup>, Y. de Carlan<sup>b</sup>, R. Logé<sup>a</sup>

<sup>a</sup>) Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF), Mines-Paristech, UMR CNRS 7635, BP 207, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France. [esteban.vanegas@mines-paristech.fr](mailto:esteban.vanegas@mines-paristech.fr)

<sup>b</sup>) CEA/DEN/DMN/SRMA, CEA Saclay, 91191 GIF-SUR-YVETTE, Cedex, France. [yann.decarlan@cea.fr](mailto:yann.decarlan@cea.fr)

### RESUME.

Pour les Réacteurs à Neutrons Rapides au sodium, les matériaux de gainage de référence pour les très forts taux de combustion sont les nuances ferritiques/martensitiques ODS. Ces matériaux présentent en effet des bonnes propriétés en fluage, en résilience et en résistance à l'oxydation. Toutefois la présence des oxydes ODS font de ces nuances des matériaux très difficiles à mettre en forme. Classiquement le tube de gainage est mis en forme à froid à partir d'une ébauche tubulaire par une succession de passes de laminage à pas de pèlerin et de traitements thermiques.

Dans le cadre de cette étude la modélisation numérique du procédé de laminage dans une configuration de type HPTR a été entreprise. Le modèle prend en compte toute la complexité des phénomènes physiques, mécaniques ainsi que le modèle de comportement du matériau pour simuler les déformations élasto-plastiques cycliques qui apparaissent au cours de la mise forme des tubes minces. La modélisation de la cinématique du procédé a déjà été réalisée. L'utilisation de capteurs numériques pour suivre le chemin de déformation de la matière lors du procédé permet d'estimer la nature et l'amplitude des déformations cycliques subies.

**MOTS CLES :** aciers 9-14 % Cr, tube, laminage à pas de pèlerin, méthode des éléments finis, ODS.

### 1. Introduction

Le laminage à pas de pèlerin de type HPTR est une opération de mise en forme à froid d'un tube sans soudure, par déformation plastique, destinée à réduire simultanément l'épaisseur et le diamètre d'un tube par passage de 3 outils (galets). Les outils (axisymétriques) tournent autour de leur axe pendant qu'ils se déplacent tout au long de l'axe de laminage (Fig. 1), c'est une passe de laminage. Entre deux passes, l'ébauche est avancée et tournée. Un élément de matière donné se déplace vers l'aval de la zone de déformation ; l'entrefer qui est laissé à cet élément décroît, ce qui assure que le coup de cage suivant assurera la réduction d'une autre zone du tube. La zone de déformation fait quelques centaines de millimètres de longueur, ce sont donc plusieurs dizaines de coups de cage qui seront nécessaires pour effectuer la déformation complète.

La surface interne est calibrée par un mandrin horizontal cylindrique axisymétrique. La cinématique des 3 zones (Fig. 2) définit

l'évolution du diamètre extérieur à travers de la direction de laminage (à savoir le «profil»), et contrôle la qualité du tube final. Un système d'engrenage pignon-crémaillère permet de synchroniser le système. La rotation a pour objectif d'empêcher l'ovalisation. On choisit un angle qui ne soit pas un sous-multiple simple de  $\pi$  pour éviter qu'une particule matérielle soit laminée toujours aux mêmes positions ortho radiales, ce qui correspond à polygonaliser le tube.

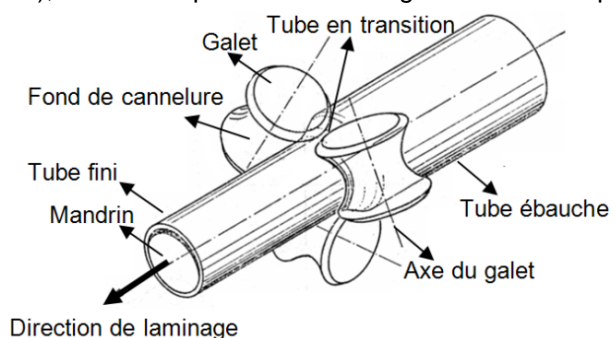


Figure 1. Vue 3D du procédé de laminage à pas de pèlerin de type HPTR, en montrant les galets glissant sans frottement à travers du system mandarin/tube. Après un coup de cage, le tube est tourné et avancé des quelques millimètres. C'est la représentation d'un cycle.

Chaque coup de cage impose un incrément de déformation plastique de quelques pour-cent. Par conséquent, la matière subit une série de petites déformations tridimensionnelles, avec une triaxialité variable [1]. Cette histoire mécanique complexe peut conduire à la nucléation de défauts (fissures longitudinales) dans le régime de la fatigue oligocyclique [2]. L'anisotropie dans le modèle rhéologique (texture cristallographique) et la distribution des particules dans la seconde phase peuvent avoir une influence significative sur ce phénomène.

Dans la figure 2, seules les deux dernières zones génèrent une déformation plastique. Le premier contact (tube / bande de roulement) a lieu à peu près à mi-longueur de la zone de déformation, ce qui permet de calibrer la simulation pour ne pas prendre en compte la partie du procédé où aucun contact n'est observé. Une autre hypothèse du modèle numérique est de considérer le processus comme isotherme (20 ° C). On suppose que le changement de température dans le matériau n'affecte pas de manière significative le comportement du matériau. Les figures 3, 4 et 5 montrent une vue en coupe transversale de chacune des 3 zones. La figure 3 ne montre aucun contact entre les outils et le tube. La figure 4 montre le contact entre les outils et le tube dans la zone de déformation, en créant un « trèfle », tube avec certaines parties en tension (dépouille, fente extérieure) et d'autres parties en compression (bande de roulement). Enfin, sur la figure 5, on voit la géométrie finale du tube en contact avec les galets et le mandrin. On note aussi la réduction d'épaisseur homogène et la petite taille de la dépouille.

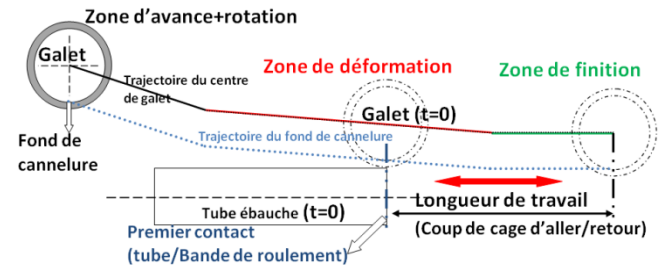


Figure 2. Description schématique des 3 zones cinématiques du procédé de laminage à pas de pèlerin de type HPTR (1. Avance+rotation 2. Déformation 3. Finition).

### Avant le coup de cage (Zone d'avance + rotation)

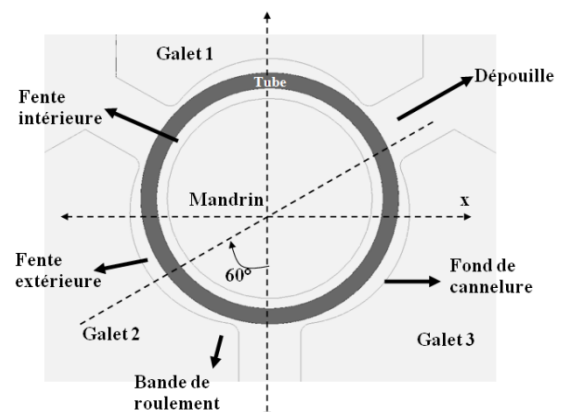


Figure 3. Section transversale du tube à une position donnée en z. Le contact avec les galets n'est pas encore établi. On constate que la bande de roulement touchera en premier la matière.

### Pendant le coup de cage (Zone de déformation)

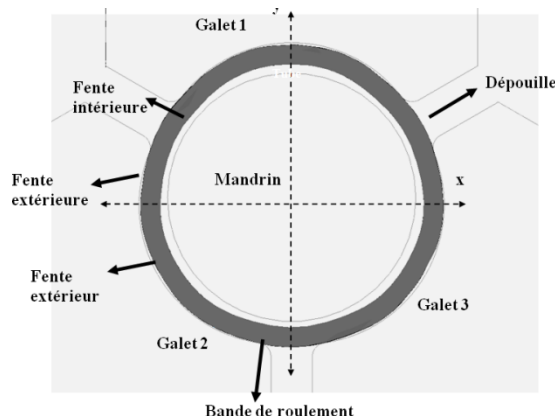


Figure 4. Section transversale du tube à une position donnée en z dans la zone de déformation. La bande de roulement déforme localement la matière, en créant une contrainte tensile sur la dépouille et sur la fente extérieure, et une contrainte compressive sur la bande de roulement. En générant un tube « trèfle ».

### Pendant le coup de cage (Zone de finition)

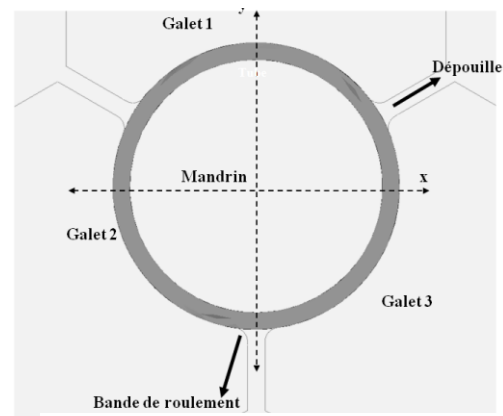


Figure 5. Section transversale du tube à une position donnée en z dans la zone de finition. On remarque la réduction d'épaisseur homogène et la petite taille de la dépouille.

## 2. Simulation numérique du procédé de laminage pas de pèlerin de type HPTR

Le logiciel éléments finis Forge3 ® [3] est utilisé pour modéliser le procédé. Les galets sont supposés rigides, qui est une hypothèse forte lorsqu'il s'agit de tubes minces. Une longueur de tube de 20 mm est considéré comme suffisante pour observer le chargement local de la matière en évitant les effets de bords. Afin de contrôler avec précision le nombre d'éléments dans l'épaisseur, un maillage structuré est utilisé. Il est basé sur une discrétisation structurée du tube avec des éléments tétraédriques. Le nombre total d'éléments est d'environ 24.000.

Forge3 ® utilise une formulation en vitesse-pression sur la base des mini éléments P1+P1 [4]. Un manipulateur est utilisé pour définir le mouvement (translation et rotation) du tube.

Tous les contacts sont unilatéraux. Un contact unilatéral représente une contrainte mécanique qui empêche la pénétration entre les deux corps. Ce contact est généralement associé à une fonction qui mesure la distance entre les deux corps et une force de contact. Le logiciel utilise une méthode de pénalisation du contact [1]. Une loi de frottement de Coulomb est utilisée avec une valeur de  $\mu = 0,15$  pour les surfaces internes et externes.

Les paramètres d'une loi de comportement cyclique d'un acier ODS sont inconnus pour le moment. On considérera donc ici le laminage à pas de pèlerin de tubes en Zircaloy-4. Par conséquent, on considère le comportement élasto-plastique monotone pour un tube (ZR4) : module de Young  $E = 99\text{GPa}$ , coefficient de Poisson de 0,37, et la loi d'écrouissage suivante [2]:

$$\bar{\sigma} = 1000 * (0.01 + \bar{\varepsilon})^{0.15} \quad (1)$$

La vitesse de translation des galets est donnée par la fonction sinusoïdale:

$$V_z = A \sin\left(\frac{2 * \pi * t}{f}\right), \quad (2)$$

où  $t$  est le temps,  $A$  l'amplitude (vitesse maximale de laminage des galets), et  $f$  la fréquence (pour un coup de cage complet).

Le coup de cage d'aller et celui de retour sont simulés. Le pas de temps est constant et fixé à  $\Delta t = 0.001\text{s}$ . La simulation complète comprend 38000 incréments avec un déplacement axial de 107 mm. Le temps CPU est de 96h en utilisant 5 processeurs d'un Opteron dual cluster (AMD 64 - 2.4 GHz/8Go mémoire).

## 3. Résultats de la simulation numérique

Des capteurs lagrangiens sont placés dans l'épaisseur du tube (Fig. 6) à mi-longueur (afin d'éviter les effets bords). Ils recueillent l'histoire mécanique subie par le point matériel pendant tout le procédé de laminage, et fournit des indications sur la nature et l'amplitude des déformations cycliques.

Le procédé est périodique dans le cadre de la machine [5], pourtant il faut 62 coups (aller + retour coup de cage) pour qu'un point matériel (capteur) passe de la zone ébauche à la zone finie. La figure 7 illustre l'influence des effets bords (manipulateur et bord du tube) sur la distribution de la déformation plastique cumulée. Les marques axiales laissées par le laminage avec une grande valeur équivalent de déformation sont également

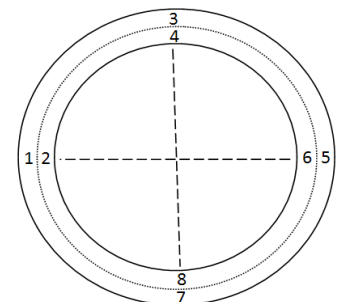


Figure 6. Position des 8 capteurs dans l'épaisseur de la section transversale du tube.

visibles sur la figure 7. Elles sont dues à la bande de roulement qui au début du procédé génère de fortes déformations locales.

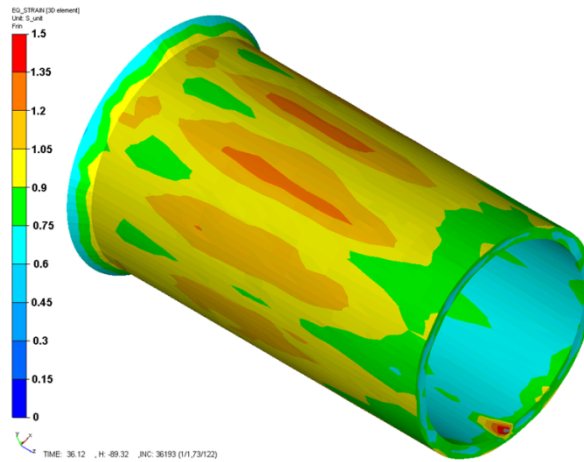


Figure 7. Déformation plastique cumulée du tube fini (25.43mm de long (pour une longueur initiale de 20mm) après 70 coups de cage.

### 3.1. Histoire thermomécanique

La figure 8 montre des valeurs intégrées dans le temps de chaque composante du tenseur des déformations en coordonnées cylindriques. Nous remarquons que, avant le 45ème coup de cage les galets conduisent principalement à une réduction du diamètre du tube puisque les déformations sont prédominantes en  $\theta\theta$ .

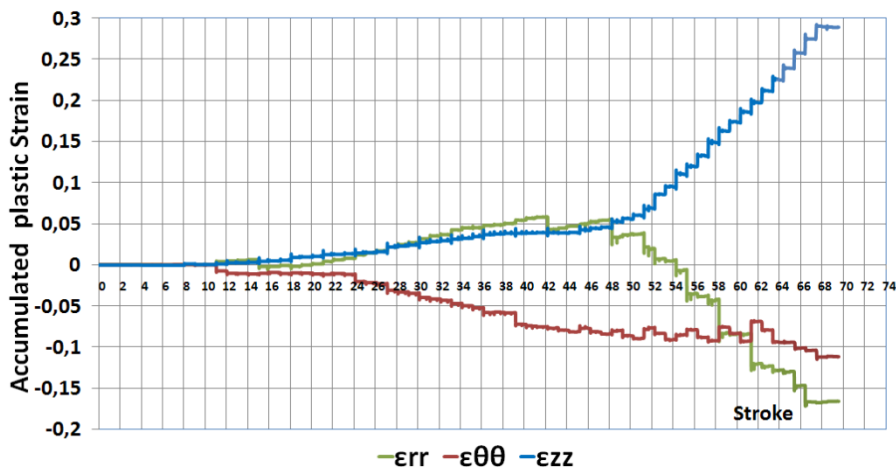


Figure 8. Déformation plastique cumulée pour chaque composant de  $\varepsilon^p$  en fonction du numéro de coup de cage. Après intégration dans le temps du tenseur de vitesse de déformation.

La plus grande partie de la déformation plastique est effectuée après le coup de cage 45 par compression entre le fond de cannelure et le mandrin, par conséquent un allongement dans la direction axiale (z) est prescrit. Comme le montre la Figure 5, le matériau peut être localement en tension dans la zone de finition, en raison de la dépouille. Dans ce cas  $\Delta\varepsilon_{\theta\theta}$  peut être positif comme nous l'expliquerons plus tard.

Dans le Tableau 1 on compare la valeur analytique de la vraie déformation plastique obtenue par l'équation 3, avec les valeurs obtenues par la simulation numérique.

$$\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{X_0}{X_f}\right) \quad (3)$$

Les écarts observés pourraient être dus au faible nombre d'éléments dans l'épaisseur du tube (seulement 2 éléments). Toutefois, la marge d'erreur reste acceptable, si nous gardons à l'esprit que les outils sont supposés rigides dans la simulation.

La conservation du volume est raisonnablement assurée quand on regarde la somme des 3 composantes intégrées, appelée  $Tr(\bar{\varepsilon})$ .

	Analytique $\bar{\varepsilon}$	Simulation $\bar{\varepsilon}$	Erreur
$\bar{\varepsilon}_{rr}$	-0.1672	-0.166	0.77%
$\bar{\varepsilon}_{\theta\theta}$	-0.108	-0.111	3.5%
$\bar{\varepsilon}_{zz}$	0.277	0.29	4.4%
$Tr(\bar{\varepsilon})$	0.0018	0.013	

Table 1. Comparaison de la valeur analytique de la vraie déformation plastique avec les valeurs obtenues par la simulation numérique.

Il est à noter que sur la figure 8, pour les coups de cage 45, 48, 51, 54, 55, 58 et 61,  $\Delta\varepsilon_{\theta\theta}$  est positif, indiquant soit une contrainte en traction dans la direction orthoradiale (Fig. 9) soit un effet de conservation de volume. Dans le premier cas (voir figure 9), ce phénomène pourrait être lié à la nucléation de l'endommagement, avec apparition d'une fissuration dans le sens axial.

On remarque aussi sur la figure 8 que  $\Delta\varepsilon_{rr}$  est essentiellement positive au cours des 42 premiers coups de cage, qui est dû à l'effet de « trèfle », qui a entraîné une augmentation de l'épaisseur. Cet effet est illustré sur la figure 10. Du 42ème au dernier coup de cage, le matériau entre en contact avec les fonds de cannelure et avec le mandrin, ce qui induit une réduction de l'épaisseur du tube (Fig. 8).

Passons aux contraintes. Ici, on se place à un stade intermédiaire du coup de cage ; lorsque les matrices sont en milieu de zone de déformation, lors de la passe aller (vers l'incrément de déformation maximale) La figure 11 est une vue générale de la carte de contrainte axiale du coup de cage 61, où le  $\Delta\varepsilon_{\theta\theta}$  est plus accrue (Fig. 8). Cette contrainte est très compressive sur la bande de roulement, là où on écrase la matière. On notera que la déformation associée dans la direction  $z$  est un allongement (positif), car, du fait de l'effet de paroi mince, le champ de contrainte est dominé par la contrainte hydrostatique, très compressive. Par contre, près du fond de cannelure la contrainte axiale est positive. Cela signifie que la triaxialité est importante, mais négative comme le montre la figure 12.

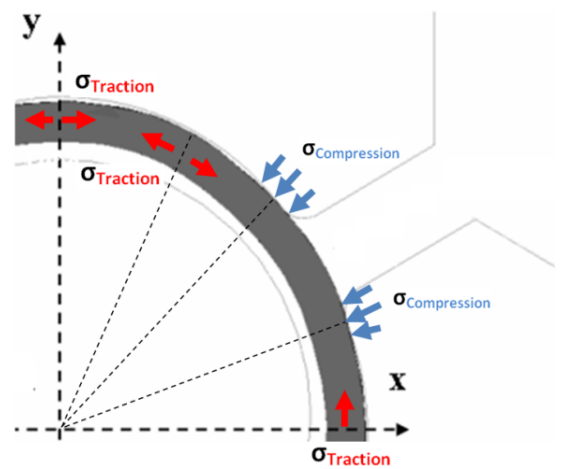


Figure 9. Géométrie « en trèfle » générée par le contact local entre la bande de roulement et les galets, et l'absence de contact au fond de cannelure.

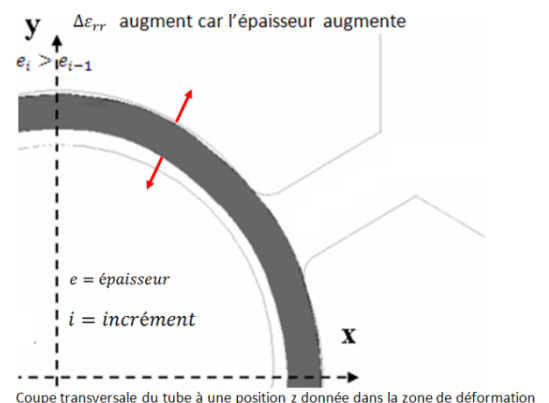


Figure 10. L'effet trèfle cause une augmentation de l'épaisseur.

Plus précisément, dans la zone de déformation sous les galets, la contrainte axiale est tensile dans la zone de la dépouille et dans la fente extérieure et compressive où la matière touche le galet (Fig. 10. Ligne grise). En se référant à la Fig. 13, la raison est claire, le tube est fortement comprimé (réduction d'épaisseur) sous la bande de roulement, entraînant un allongement dans la direction axiale  $z$ , qui est nécessairement homogène partout dans le tube.

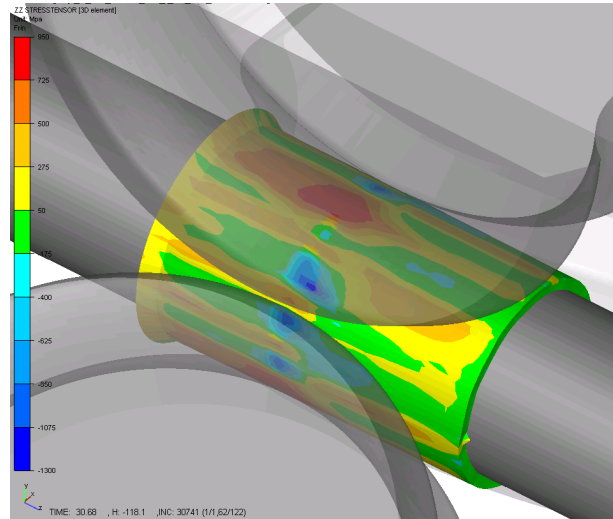


Figure 11. Carte de contrainte axiale montrant la forte tension en fond de cannelure et la forte compression près de la bande de roulement.

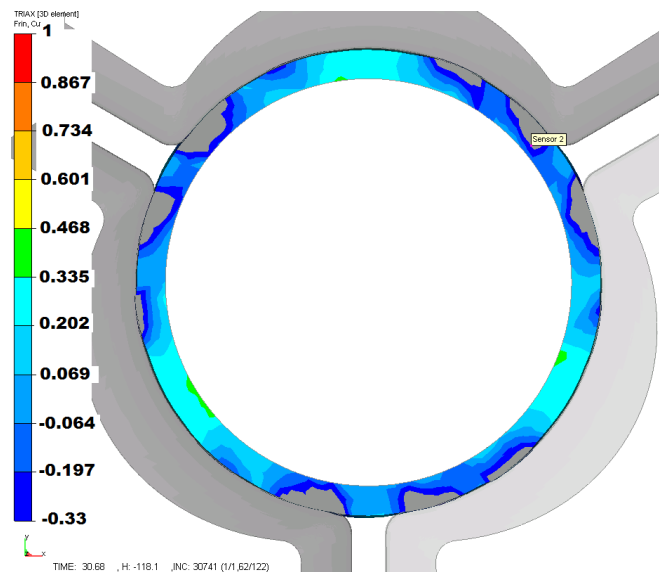


Figure 12. Triaxialité des contraintes. Coup de cage 61.

Ce phénomène est accompagné par un écoulement orthoradial. La contrainte orthoradiale  $\sigma_{\theta\theta}$  est tensile (Fig. 14) dans la zone du fond de cannelure car le diamètre est augmenté en raison de la présence de surfaces libres (géométrie « en trèfle » expliquée précédemment). On constate que la partie interne (près du mandrin) du fond de cannelure est la seule à être tensile.

Enfin, la contrainte et la déformation radiale sont également positives lorsque les surfaces libres existent, (fente extérieure et dépouille). Les valeurs en traction de la contrainte radiale sont faibles en comparaison avec celles de compression. Le renflement léger est dû à une déformation radiale  $\varepsilon_{rr}$  positive, générée dans le tube. Il est illustré sur la Figure 15, et correspond à la zone de la bande de roulement du coup de cage



précédente. Comme ces bosses ont une épaisseur accrue, le contact avec le fond de cannelure est produit, conduisant à une contrainte compressive  $\sigma_{rr}$ .

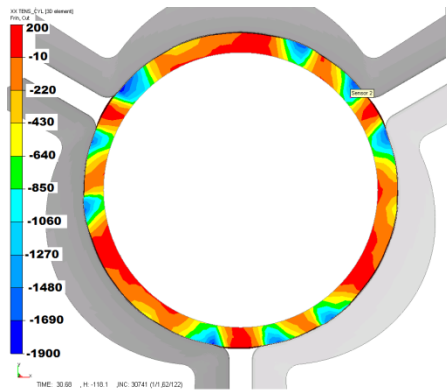


Figure 13. Section transversale du coup de cage No. 61 montrant les isovaleurs de  $\sigma_{zz}$  [Mpa] et la position du capteur 2 ( $z = 249\text{mm}$ ).

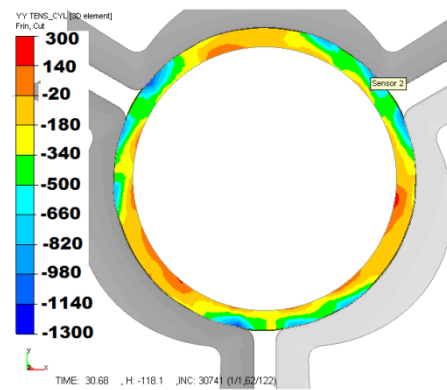


Figure 14. Section transversale du coup de cage No. 61 montrant les isovaleurs de  $\sigma_{\theta\theta}$  [Mpa] et la position du capteur 2 ( $z = 249\text{mm}$ ).

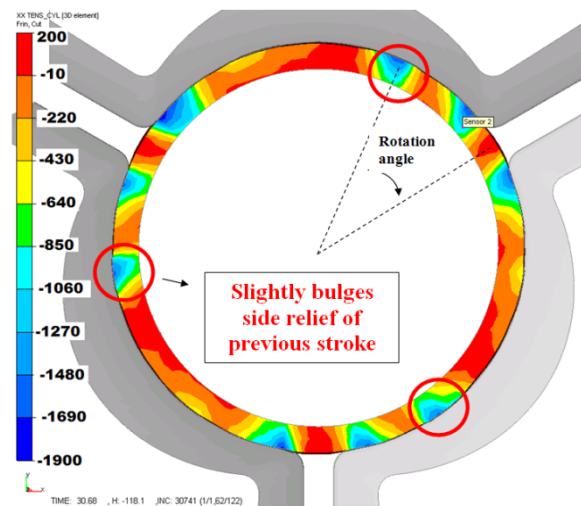


Figure 15. Section transversale du coup de cage No. 61 montrant les isovaleurs de  $\sigma_{rr}$  [Mpa] et la position du capteur 2 ( $z = 249\text{mm}$ ).

Les données expérimentales indiquent une tendance à ouvrir les fissures dans le sens longitudinal du tube, par conséquent, sous l'influence d'un chargement orthoradial ( $\varepsilon_{\theta\theta}, \sigma_{\theta\theta}$ ). Une analyse plus détaillée de ces effets est donc entreprise.

Fig. 16 montre l'histoire de la vitesse de déformation orthoradiale d'un point matériel (capteur 2), décrit précédemment. L'état compressif domine mais les quelques cas isolés en traction pourraient conduire à la nucléation d'une fissure.

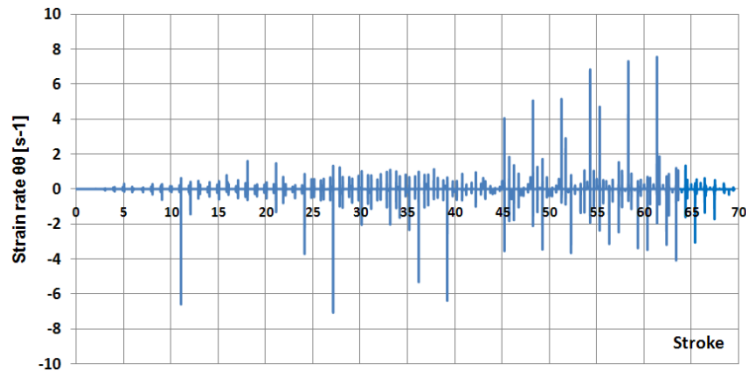


Figure 16. Histoire de 70 coups de cage de la vitesse de déformation plastique ortho radiale, montrant les successives compressions (contact des galets) et l'expansion (dépouille et fente extérieure).

La figure 17 montre en détail le coup de cage 61, car la vitesse maximale de déformation positive,  $\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}$  se produit à ce moment là.

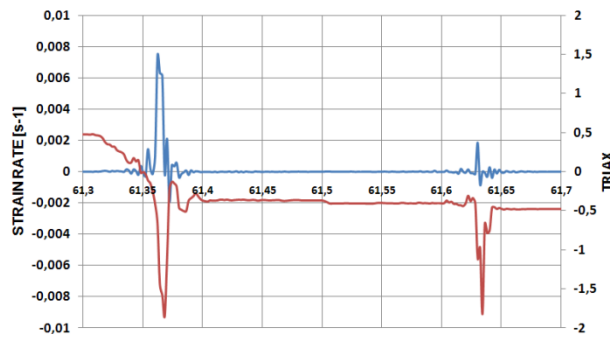


Figure 17. Détail de la contrainte et du taux de déformation dans le sens orthoradial du coup de cage No. 61.

La triaxialité des contraintes (Fig. 17) dans ce coup de cage est négative, d'ailleurs la contrainte orthoradiale (Fig.14) est faible, elle ne dépasse pas la limite élastique. Par conséquence, l'origine de cette amplitude de déformation est liée au respect de la conservation de volume ( $\Delta\varepsilon_{rr} + \Delta\varepsilon_{\theta\theta} + \Delta\varepsilon_{zz} = 0$ ).

D'ailleurs, la déformation dans ce coup de cage est dominée par  $\Delta\varepsilon_{rr}$ , comme on peut le constater sur les Figures 18.

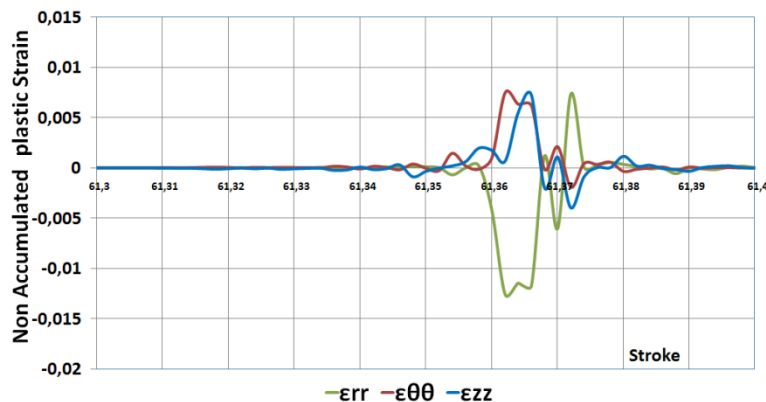


Figure 18. . Détail du taux de déformations du coup de cage No. 61.

A l'exception de  $\varepsilon_{zz}$ , toutes les composantes de la déformation et des contraintes oscillent entre des valeurs positives et négatives. Une analyse plus systématique de tous les cycles pourrait contribuer à l'étude de la fatigue oligocyclique de la matière. Pour cela, il est nécessaire de définir un critère d'endommagement [2]. Par



ailleurs, le développement d'un modèle de comportement capable de simuler des déformations plastiques cycliques est en cours afin de représenter un chargement multiaxial.

L'utilisation d'une loi de comportement cyclique nous montrera si les risques des fissures sont liés aux propriétés des matériaux ou aux propriétés du procédé et ainsi optimiser la tendance à la fissuration.

#### **4. Conclusions**

La présente étude a démontré la faisabilité détaillée de la mise en forme des tubes par le procédé de laminage à pas de pèlerin de type HPTR en utilisant la méthode des éléments finis. Des tendances générales ont été obtenues et ont besoin d'être confronté à des expériences.

Une analyse de sensibilité à la taille de maille doit être effectuée afin d'évaluer la précision des calculs en cours.

Un modèle de comportement cyclique doit être identifié à partir d'expériences appropriées, compte tenu de l'histoire thermomécanique identifiée par le modèle d'éléments finis et les éventuels effets anisotropes en raison de la texture cristallographique du matériau.

Une loi d'endommagement anisotrope pourrait être envisagée aussi dans l'avenir, en raison de la répartition spatiale de la direction des particules de seconde phase dans les aciers ODS.

#### **References**

- [1] P. Montmitonnet, R. Logé, M. Hamery, Y. Chastel, J-L. Doudoux, J-L. Aubin. 3D elastic-plastic finite element simulation of cold pilgering of zircaloy tubes. J. Mater. Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 814-820, 2002.
- [2] B.Lodej, K.Niang, P. Montmitonnet, J-L Aubin. Accelerated 3D FEM computation of the mechanical history of the metal deformation in cold pilgering of tubes. J. Mater. Processing Technology 177, 188-191, 2006.
- [3] S. Mulot, A. Hacquin, P. Montmitonnet, J-L. Aubin, A full 3D finite elements simulation of cold pilgering, J. Mater. Process. Technol. 125-126 814-820, (2002).
- [4] J-L. Chenot, L. Fourment, K. Mocellin, Numerical treatment of contact and friction in FE simulation of forming process, J. Mater. Process. Technol. 125-126. 42-52.
- [5] S. Mulot, doctoral thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 1997.
- [6] E. Girard, R. Guillén, P. Weisbecker, M. François. Effect of plastic shearing damage and texture on Zircaloy-4 cladding tubes: experimental and numerical study. J. of nuclear materials 294, 330-338, 2001.
- [7] J. Chaboche, J. Lemaitre. Mécanique des matériaux solides. Dunod, Paris, 1996.
- [8] C. Lange, Etude physique et modélisation numérique du procédé de sertissage de pièces de carrosserie, Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [9] V. Velay, Modélisation du comportement cyclique et de la durée de vie d'aciers à outils martensitiques, Thèse, Ecole des Mines d'Albi, 2003.